

投弃式海流剖面仪探头流场数值模拟

陈文义¹, 张瑞¹, 刘宁², 张曼曼¹, 陶金亮¹

1. 河北工业大学过程装备与控制工程系, 天津 300130
2. 国家海洋技术中心, 天津 300112

摘要 以三维 Navier-Stokes 方程为控制方程, 结合 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型, 采用隐式有限体积法对投弃式海洋剖面仪 (XCP) 探头进行数值模拟, 分析 XCP 探头周围流场的分布情况。根据 XCP 探头周围流场分布, 对探头的运动特性, 重点是探头的头部和尾翼流场进行分析。研究表明, 在探头迎流前端小于 10cm 处, 流体层流边界层发展为湍流边界层, 因此探头头部的弧线型设计对于保证探头获得稳定的下落速度作用至关重要, 探头尾翼虽然会减小下落速度, 但有利于保证探头稳定的垂直下落姿态。研究结果验证了模拟计算方法的准确性, 同时为同类探头的优化设计提供了参考依据。

关键词 数值模拟; 流场; XCP 探头; 运动规律

中图分类号 P716

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)20-0062-04

Numerical Simulation the Flow Field of Expendable Current Profiler Probe

CHEN Wenyi¹, ZHANG Rui¹, LIU Ning², ZHANG Manman¹, TAO Jinliang¹

1. Department of Process Equipment and Control Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China
2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract In order to study the flow field of the Expendable Current Profiler (XCP) probe, based on the 3D Navier-Stokes equations for viscous unsteady incompressible flow, two-equation turbulence models are applied, the interaction flow field over the XCP probe is numerically simulated by implicit finite volume methods. The motion characteristics of the XCP probe are analyzed based on the flow field, especially, the flow field at the probe's tail and head. The simulated results show that the flow field is symmetrical, and the flow separation does not occur around the XCP probe. The laminar boundary layer is transformed into the turbulent boundary layer, which appears in the front-end 10cm of XCP probe. The head of the probe's arc design plays a very important role in the rapid and steady falling. The probe's tail has no advantage for fast falling, but contributes in keeping the vertical falling stance. These results verify the feasibility and effectiveness of this numerical analysis method and also provide a guidance for the optimization design of similar probes.

Keywords numerical simulation; flow field; XCP probe; characteristics of motion

0 引言

投弃式海流剖面仪 (Expendable Current Profiler, XCP) 可快速获取海洋环境参数剖面, 主要应用于海洋环境预报、海洋环境监测、海洋军事和海军舰船的机动海洋动力环境观测等方面, 对于国民经济、社会发展、军事等具有重要战略意义, XCP 探头的研究对海洋经济的发展具有举足轻重的作用。20 世纪 70 年代, 中国开始研究船用投弃式海流剖面测量

技术, 20 世纪 80 年代, 国家海洋技术中心研制了机载投弃式温深计 (AXB T), 之后又开展了机载投弃式温盐深计 (AXSTD) 的研制。21 世纪初, 国内开展了 XCP 探头的研究, 相关理论处于探索中。孙涛等^[1]分析了抛弃式温盐探头入水速度损失、运动阻力系数等运动参数, 同时分析了探头运动过程中质量改变与海水密度不同对其运动规律的影响, 最终得到探头下落距离和时间的关系。黄银水等^[2]在已有的形状完全相同但

收稿日期: 2010-08-25; 修回日期: 2010-09-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (C2006AA09A304); 河北省自然科学基金项目 (D2009000035)

作者简介: 陈文义, 教授 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030000113S), 研究方向为工程中的流体力学问题、过程强化, 电子信箱: cw632163.com

线圈不释放条件下,根据实验资料拟合出探头在海水中的阻力系数与雷诺数的关系式,并对此进行了分析和验证。肖鸿等^[3]对抛弃式温盐探头阻力系数进行了数值模拟研究,刘宁等^[4]对 XCP 探头的测量原理进行了研究。但关于 XCP 探头的水下运动特性方面数值模拟和试验研究在国内仍处于空白状态,国外关于 XCP 探头的研究也仅限于海域试验,对其水中流场运动规律的研究鲜有报道。因此,研究 XCP 探头流场分布情况对研究其水下运动规律具有重要的实际意义。

本文以国家海洋技术中心提供的 XCP 探头为模型,运用 Fluent 流体计算软件,采用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,对 XCP 探头周围流场进行了数值模拟研究。分析了 XCP 探头附近流场流动情况,重点研究了探头的头部和尾翼流场分布,确定了探头头部和尾翼的设计对探头水中稳定下落的重要作用,研究结果为 XCP 探头的结构优化设计提供了一定的理论参考。

1 数值模拟方法

1.1 计算外形

XCP 探头在水中自由释放后,以垂直姿态旋转下沉,对海流参数进行采集。探头全长 460mm,采用流线型主体和非对称旋转尾翼设计。整个探头可分为头部、圆柱筒身、中间过水管和尾部 4 部分,尾部旋转尾翼由 4 片叶片组成,探头外形如图 1 所示。

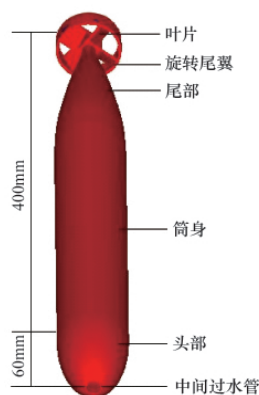


图 1 XCP 探头外形示意图

Fig. 1 Configuration of XCP probe

1.2 控制方程和求解方法

假设计算流场为黏性、不可压缩非稳态流场,基本控制方程为 Navier-Stokes 方程:

$$\begin{cases} \rho \frac{Du}{Dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{cases}$$

其中, $\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, ∇ 为拉普拉斯算子, ρ 为流体密度, p 为压力, u, v, w 为流体在 t 时刻点 (x, y, z) 处的速度分量; X, Y, Z 为外力分量; μ 为黏性系数,依赖于流体的性质。

Y, Z 为外力分量; μ 为黏性系数,依赖于流体的性质。

计算模型采用隐式有限体积法求解,为了使基本控制方程可解,结合 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型^[5]使控制方程封闭。为了得到更准确的计算结果,采用当地时间步长加速收敛。速度和压力的耦合计算采用 Simple 算法,对流项的离散采用二阶迎风格式。

2 网格划分与计算边界条件的选择

2.1 网格划分

网格划分如图 2 所示。为了保证探头尾翼流场充分展开,以 XCP 探头为几何中心,取 10 倍于轴向长度、10 倍于径向长度的圆柱体区域作为计算域。为控制数值模拟中网格数量和计算质量,取 1.5 倍于轴向长度、1.4 倍于径向长度的小圆柱体作为网格加密区域^[6]。采用分体网格画法,共生成 112×10^5 个非结构计算网格。

2.2 计算边界条件选择

将计算域外边界包括模型表面设定为无滑移壁面。计算域进口设置为速度入口,出口为 outflow。为加快计算速度,采用 Reorder 程序处理^[7]。

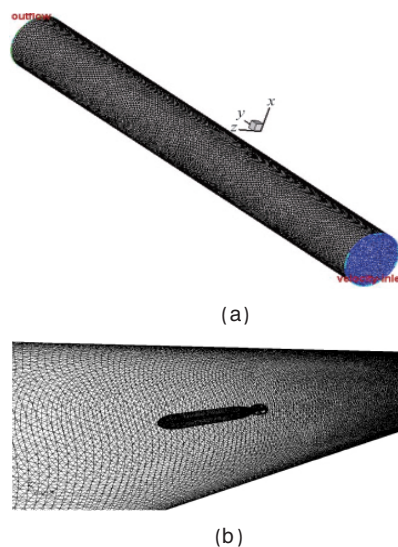


图 2 XCP 探头网格简图

Fig. 2 Schematic diagram of meshes for XCP probe

3 数值模拟结果

设定海水来流速度 $v=2.6, 3.2, 3.8, 4.4, 5.0, 5.6$ m/s,对探头进行模拟计算,得到不同来流速度下探头周围流场的分布(图 3)。

由图 3 可知,不同来流速度下, XCP 探头周围流场变化趋势类似,流场分布基本对称,流体沿探头附着流动,未出现流场分离,可以初步判定 XCP 探头流线型设计的合理性。流体经过探头时,在头部和尾翼处产生较大的速度梯度变化;流体经过探头头部后,在探头两侧产生较大的速度场,尤其是头部附近。流体通过尾翼过程中,速度迅速变小,通过尾翼后逐渐增大。

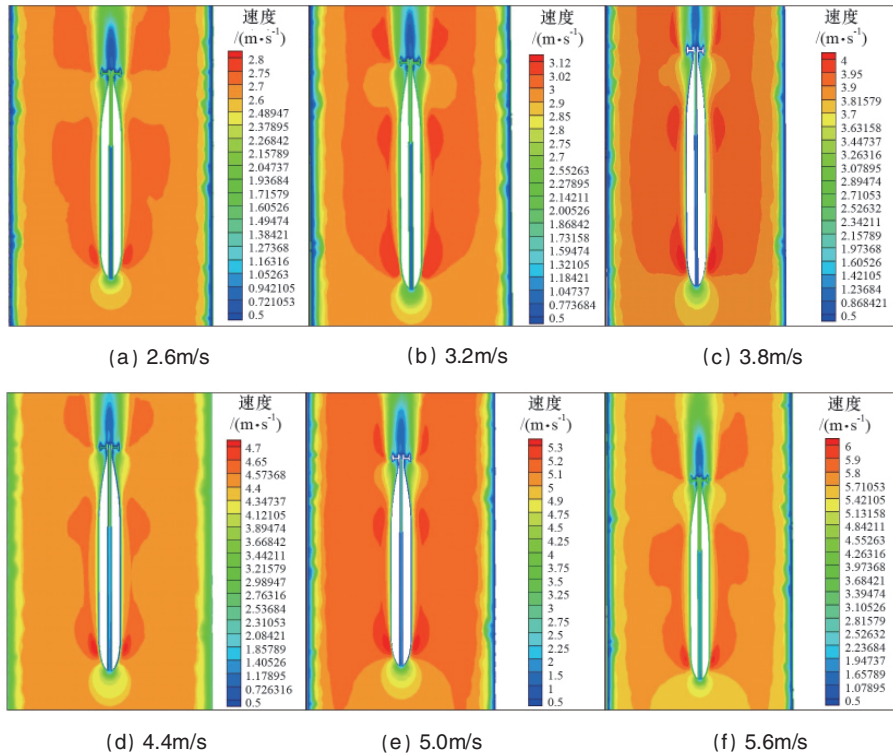


图3 不同来流速度时的XCP探头轴截面速度分布

Fig. 3 Velocity vectors of axial cross-sections under different velocities

3.1 XCP 探头头部运动特性分析

由于不同来流速度下的流场特性基本一致,选取 2.6m/s 时的流场进行分析,XCP 探头头部速度分布如图 4 所示,海水流动受到探头的阻碍,使得来流速度在探头正前方快速减小。当海水绕过头部前端弧线部分后,速度沿流向迅速增大,甚至大于来流速度。虽然头部造成探头较大的阻力损失,但其弧线形设计有利于探头在海水中获得稳定的下落速度,这符合机械制造经验,且与 K. Shoichi 等^[8]的试验结果相符。

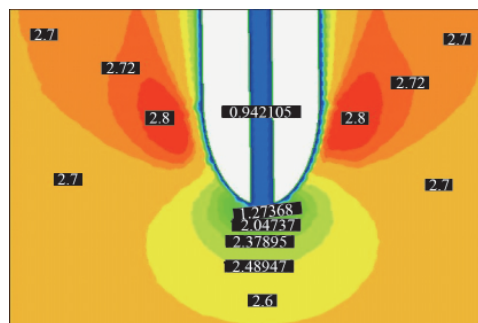


图4 XCP 探头头部速度分布(单位:m/s)

Fig. 4 Velocity distribution of XCP probe's head (unit: m/s)

湍流强度是衡量湍流强弱的相对标准,为了更好地分析探头头部流动变化趋势,对 XCP 探头头部湍流强度分布进行模拟,得到湍流强度矢量分布如图 5 所示,探头的湍流强度变化主要集中在探头头部前端。由图 5 可以得到不同来流速度下湍流强度随探头轴向位置变化曲线如图 6 所示,不同来

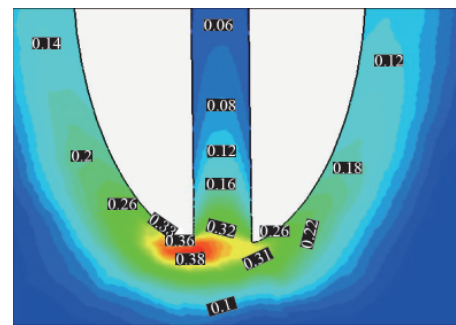


图5 XCP 探头头部湍流强度分布

Fig. 5 Turbulence intensity of XCP probe's head

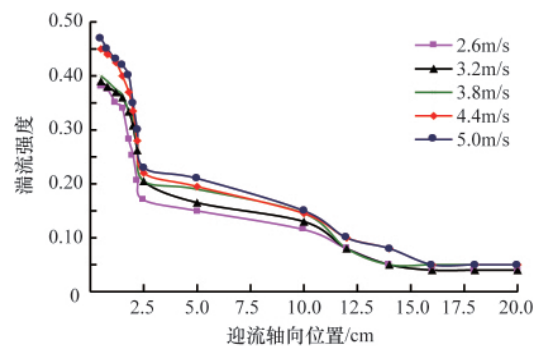


图6 湍流强度与探头头部轴向位置关系曲线

Fig. 6 Relationship between axial position of XCP probe's head and turbulence intensity

流速度的海水冲击探头时,在探头迎流前端小于 10cm 处,海水产生很大的湍流强度。可以预测,在探头头部前端小于 10cm 处,流体由层流边界层变为湍流边界层,这与 Lancaster^[9]风洞试验结果一致,证明了该数值计算方法的可靠性。

3.2 XCP 探头尾翼流场运动分析

为了更好地研究探头尾翼对流场分布的影响以及尾翼流场的变化情况,对比分析了尾翼流场与无尾翼探头流场,流场分布图如图 7、图 8 所示。对比两图可知,海水通过无尾翼探头后在尾部海水流速迅速增大;海水通过尾翼时,受尾翼阻碍,流速迅速变小,速度增大相对缓慢;由此可知尾翼对来流速度造成损失,减小了下落速度。

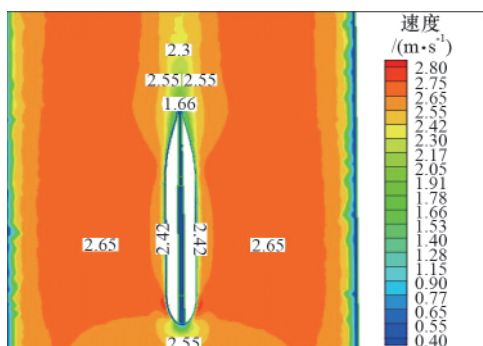


图 7 无尾翼探头流场分布

Fig. 7 Flow field distribution of tailless probe

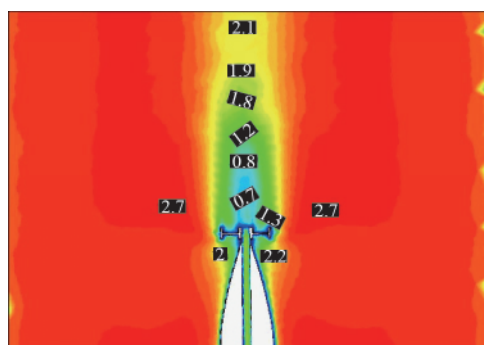


图 8 尾翼流场分布放大图(单位: m/s)

Fig. 8 Flow field distribution of probe's tail with enlarged scale (unit: m/s)

升力方向与速度方向垂直,是造成 XCP 探头下落过程中倾斜的主要原因。图 9 为 XCP 探头在无尾翼和有尾翼情况下的升力变化曲线,从图中可看出,在无尾翼情况下 XCP 探头的升力明显大于有尾翼情况,并且随着探头倾斜角度的变大升力变化率逐渐增大。因此,虽然探头的尾翼会牺牲掉部分下落速度,但对保持水中稳定的垂直下落姿态起重要作用。

4 结论

1) XCP 探头主体采用流线型设计,流线型设计流场分布均匀对称,未发生流动分离现象,有利于产生较小的阻力。

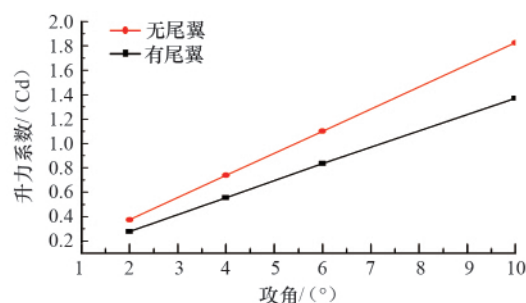


图 9 XCP 探头有尾翼与无尾翼情况的升力变化曲线
Fig. 9 Lift curve between tail probe and tailless probe

2) XCP 探头湍流强度变化主要发生在探头迎流前端小于 10cm 处,海水通过头部前端弧线部分后流速变大,头部的弧线型设计有利于探头获得稳定的下落速度。

3) 相比无尾翼探头,海水流过 XCP 探头尾翼后流速不能迅速展开,虽然造成了下落速度的损失,但对保证探头稳定的垂直下落姿态起至关重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] 孙涛, 黄银水, 陶建华. 抛弃式温盐探头运动的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋通报, 2002(4): 69-76.
Sun Tao, Huang Yinshui, Tao Jianhua. *Marine Science Bulletin*, 2002(4): 69-76.
- [2] 黄银水, 陶建华. 线圈释放式温、盐、深探头运动特性的数值计算方法研究[J]. 海洋技术, 2003(3): 45-48.
Huang Yinshui, Tao Jianhua. *Journal of Ocean Technology*, 2003(3): 45-48.
- [3] 肖鸿, 刘长根, 陶建华. 抛弃式温盐探头阻力系数的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋技术, 2006(3): 35-37.
Xiao Hong, Liu Changgen, Tao Jianhua. *Journal of Ocean Technology*, 2006(3): 35-37.
- [4] 刘宁, 何鸿鲲. 投弃式海流剖面仪测量原理研究 [J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 8-11.
Liu Ning, He Hongkun. *Journal of Ocean Technology*, 2010, 29(1): 8-11.
- [5] 董秉纲. 鱼类波状游动的推荐机制[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 69-74.
Tong Binggang. *Journal of Mechanics in Engineering*, 2000, 22(3): 69-74.
- [6] 刘曜, 刘志柱. 某水下航行体尾翼展开过程中流场的数值模拟 [J]. 力学与实践, 2006, 28(4): 21-22.
Liu Yao, Liu Zhizhu. *Journal of Mechanics in Engineering*, 2006, 28(4): 21-22.
- [7] 于勇. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
Yu Yong. *Fluent introductory and advanced tutorial* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.
- [8] Shoichi K, Hiroji O, Toshio S, et al. Evaluation of the fall rates of the present and developmental XCTDs [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(4): 571-586.
- [9] Richard W L. Brief report on wind tunnel testing of present and new XCP[J]. *Sippican Ocean Systems*, 1982, 18: 2-3.

(责任编辑 刘志远)